

## 하천제방 붕괴 양상의 실험적 연구(II)

### - 축조재료 및 다짐도의 영향

## An Experimental Study on the Collapse Phase of a River Levees(II)

### - Effect of the Soil Properties and Compactness

이 종 태\* / 이 상 태\*\*

Lee, Jong Tae / Lee, Sang Tae

---

#### Abstract

The effects of bank crest width, slope steepness, soil properties, and soil compactness on the characteristics of levee breach due to overflow were investigated through a series of experiments. Generally, the major factors influencing the breach phenomenon are compactness, soil properties, crest width, and slope steepness, in that order. Using proper soil, and ensuring enough compactness in bank construction are very essential for extending breach duration and reducing peak overflow through the collapsed bank. The results of this experiment indicated that the suggested ranges for the values of breach duration, breach width, width-to-depth ratio, and side slope of the breach section, proposed by Singh, MacDonald and Fread based on the field data for earth dam breaks were reasonable. We found that those criteria could also be applied to the phenomenon of levee breaching.

*keywords* : levee, soil compactness, soil properties, levee breach, scour, peak discharge

---

#### 요 지

본 연구는 하천제방의 마루폭, 비탈경사, 축조재료와 다짐도의 변화에 따른 월류로 인한 제방붕괴특성을 수리모형실험을 통하여 분석하였다. 전반적으로 제방붕괴양상에 가장 영향을 주는 특성치는 다짐도, 축조재료, 마루폭, 비탈경사의 순으로 분석되었다. 제방붕괴로 인한 붕괴부의 세굴깊이 및 형태를 검토하였으며, 다짐도와 비탈경사 등의 영향이 큰 것으로 나타났다. 본 실험을 통하여 제방축조시의 충분한 다짐과 적절한 축조재료의 선택이 제방의 붕괴지속시간을 지연시키고, 붕괴홍수량을 억제하는데 가장 효과적인 것으로 분석되었다. 본 실험에서 측정된 붕괴지속시간, 붕괴폭의 제방고에 대한 비 및 붕괴부 측면경사 등은 흙댐에 대하여 Singh, Fread 및 MacDonald 등이 제안한 범위에 해당됨으로써 이들 기준을 제방에도 적용할 수 있음을 확인하였다.

**핵심용어** : 하천제방, 다짐도, 축조재료, 수리모형실험, 제방붕괴, 붕괴지속시간, 세굴, 종단비·횡단비, 평면비, 침투월류량, 홍수피해

---

\* 경기대학교 토목환경공학부, 교수

Professor, Department of Civil Engineering, Kyonggi Univ., Seoul, Korea (E-mail : jtlee@kuic.kyonggi.ac.kr)

\*\* 대한전문건설협회, 산업정책본부장

Director, Korean Specialty Contractors Association, Seoul, Korea (E-mail : stlee003@ksca.or.kr)

## 1. 서 론

하천의 설계홍수량을 초과하는 홍수의 경우에는 홍수량이 하천제방을 월류하여 제방을 붕괴시키며 이로 인하여 제내지의 광범위한 지역에 홍수 재해를 초래하게 된다. 비교적 하천 개수가 잘 이루어진 한강, 금강 등의 직할하천 일부구간에서도 제방붕괴로 인한 침수 피해가 발생한 바 있다. 즉, 1980년 7월 보청천 유역에서 하천제방붕괴 유실로 큰 피해가 있었고, 1987년 7월 금강유역의 부여, 논산, 강경지역에서는 제방월류 및 붕괴로 인한 대범람의 피해가 발생하였으며, 1990년 9월 한강하류 일산제 제방붕괴로 인한 일산지역의 대침수 피해, 1991년 8월 태풍 Gladys에 의한 부산 수영강 상류부의 제방월류에 따른 저지대 침수, 1992년 9월 방조제 붕괴로 인한 목포시의 침수피해를 입었고, 1996년과 1999년에는 임진강유역의 대홍수로 인한 제방월류 등으로 큰 피해를 겪은 바 있다.

또한 대도시를 관류하는 주요하천 제방의 예기치 못한 붕괴로 인한 피해는 막대한 인명과 재산의 피해를 줄 수 있기 때문에 제방축조시에는 관련규정에 의한 철저한 시공으로 제방의 안전성을 향상시킴으로써 홍수피해를 경감시킬 수 있다.

하천제방의 붕괴로 인한 홍수피해는 붕괴부의 규모와 범람 홍수량에 따라 그 피해의 정도가 다양하므로 월류로 인한 제방의 유실단면형과 붕괴속도 및 이에 따른 범람하류부의 지형변화 등을 이해하는 것은 매우 중요하다. 그러나 제방축조재료와 시공관리에 따른 붕괴부의 발달과정과 홍수량에 관한 이론적인 접근방법은 아직까지 충분히 마련되어 있지 못하여 실험적 방법에 크게 의존하고 있는 실정이다.

본 연구에서는 제방의 축조재료와 다짐의 정도가 제방의 붕괴에 미치는 영향을 실험을 통하여 검토함으로써 내수성 있는 제방의 설계와 시공을 위한 기초자료를 제공코저 하였다.

## 2. 제방의 축조재료 및 다짐도에 따른 붕괴특성

### 2.1 제방 축조재료의 혼합비와 붕괴특성

제방축조재료는 모래질 흙, 모래, 실트질 흙, 모래와 자갈 등을 이용하여 제방을 축조할 수 있으나, 일반적으로 실트와 모래가 혼합된 경우가 많으며 다짐 등을 고려할 때 시공관리가 용이하다. 본 연구에서는 실트와 모래의 구성비를 70:30으로 한 경우(기준단면: 실험 A-1)와 구성비가 60:40(실험 C-2)인 경우 그리고 80:20(실험 C-3)인 경우로 각각 모형을 제작하여 제방축조재료 변화가 제방붕괴에 미치는 영향을 검토하였다. 또 이 때의 다짐은 다짐봉에 의하여 4층으로 나누어 3회다짐을 실시하였으며, 다짐도는 80%에 근사하도록 하였다(이상태, 1998).

#### 2.1.1. 월류량과 붕괴속도

제방축조재료의 변화에 따른 붕괴부로의 월류수문곡선과 붕괴지속시간에 대하여 검토하였다. 이 때의 각 실험조건은 표 1과 같다.

제방축조재료를 점성이 낮은 모래의 비율을 기준단면의 경우보다 10% 증가시켜 실트 60%와 모래 40%로 축조된 제방단면실험(C-2)에 대한 실험을 실시하고 붕괴로 인한 월류량 수문곡선과 붕괴지속시간 등을 측정하였다. 즉, 제방월류시작 2분 후부터 붕괴부가 형성되기 시작하여 1분 15초 후인 3분 30초에는 월류량이 70.0 l/sec로서 최대치에 달하였다. 이 실험에서의 최대유량 70.0 l/sec는 유입량 6.1 l/sec의 약 11.5배이며, A-1 실험에서의 최대유량 50.0 l/sec보다 40% 큰 침투유량이 값이다. 이때 침투월류량의 발생시간은 기준단면의 경우보다 약 15초 빠른 3분 30초에 발생하였으며, 붕괴지속시간도 기준단면보다 약 15초 정도 빨랐다.

한편 모래의 비율을 기준단면보다 10% 작게하여 실

표 1. 제방축조재료의 혼합비와 실험 조건

실험명	마루폭 (cm)	제방고(cm)	경사	제방축조재료(%)		공급유량 (l/s)
				실트	모래	
A-1(기준)	20	40	1 : 2	70	30	6.1
C-2	20	40	1 : 2	60	40	6.1
C-3	20	40	1 : 2	80	20	6.1

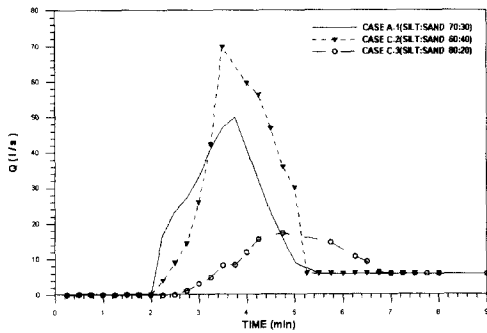


그림 1. 제방축조재료의 혼합비와붕괴 홍수파의 수문곡선

트 80%와 모래 20%로 축조한 제방단면실험(C-3)에 대하여 실험하였다. 이 경우 월류수에 의한 제방사면의 붕괴는 A-1, C-2 실험의 경우보다 실트질이 많음으로 인한 점착력의 증대로 약 30초 더 늦게 시작되었다. 침투발생 시간도 기준단면 A-1 실험보다도 약 1분 후인 4분 45초에 발생되었고, 최대월류량은 17.0 l/sec로 측정되었다. 이 실험에서의 최대유량 17.0 l/sec는 유입량 6.1 l/sec의 약 2.8배이었고 기준단면 A-1 실험에서의 최대유량 50.0 l/sec보다 약 66% 작은 유량이었으며, 붕괴지속시간도 A-1, C-2 실험보다 더 길게 지속되었다(표 1, 그림 1).

표 2. 제방축조재료의 혼합비와 실험의 붕괴시간 및 월류량

실험명	혼합비 (실트:모래)	붕괴시작시간 (분/초)	침투발생시간 (분/초)	붕괴지속시간		침투월류량	
				(분/초)	증감비율(%)	(l/sec)	증감비율(%)
A-1(기준)	70:30	2/00	3/45	5/30	0	50.0	0
C-2	60:40	2/00	3/30	5/15	-4	70.0	+40
C-3	80:20	2/30	4/45	6/45	+22	17.0	-66

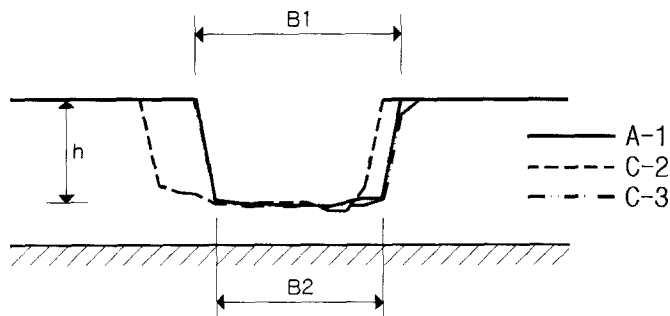


그림 2. 제방 축조재료혼합비 변화에 의한 제방붕괴 양상

이상의 제방 축조재료혼합비 변화 실험결과로부터 모래의 구성비가 클수록 제방붕괴 시작이 빠르고 모래의 구성비가 작을수록 제방 붕괴시작이 늦음을 알 수 있었다. 한편 침투유량의 크기는 모래의 구성비가 높을수록 보다 크게 나타내는 경향을 보였다. 즉, 제방 축조재료에서 실트가 증가됨에 따라 침투유량발생시간은 지체되고 붕괴지속시간은 길어짐을 알 수 있었다.

### 2.1.2 붕괴폭

본 실험에서 나타난 제방의 붕괴단면은 일반적으로 사다리꼴 형태를 나타냈다. A-1 실험에서의 붕괴단면은 상부폭 55.8cm, 하부폭 45.7cm, 깊이 27.7cm로 전형적인 사다리꼴 형태를 띠었다. 또한 C-2 실험에서는 상부폭 65.4cm, 하부폭 55.3cm, 깊이 27.0cm로 나타나 붕괴면적이 가장 크게 나타났다. C-3에서는 상부폭 60.9cm, 하부폭 45.8cm, 깊이 27.7cm로 측정되어 A-1 실험에서의 유사한 결과를 보였다(그림 2, 표 3).

### 2.1.3 붕괴부의 형상과 확대과정

제방의 침식은 유입수의 소류작용으로 계속되어 세굴구덩이는 세장 평면형상을 나타내었다(그림 3). A-1 실험에서의 바닥 최심 세굴심은 제방 앞비탈 끝에서 135cm 지점에 4.7cm가 세굴되고 바닥이 세굴된 길이

표 3. 제방 축조재료혼합비 변화에 따른 평균 붕괴폭

실험명	혼합비 (실트:모래)	붕괴상부폭(B1)		붕괴하부폭(B2)		붕괴평균폭		붕괴깊이(h)		붕괴면적	
		(cm)	증감비율 (%)	(cm)	증감비율 (%)	(cm)	증감비율 (%)	(cm)	증감비율 (%)	(cm <sup>2</sup> )	증감비율 (%)
A-1(기준)	70:30	55.8	0	45.7	0	50.9	0	27.7	0	1409.0	0
C-2	60:40	65.4	+17	55.3	+21	60.4	+18	27.0	-3	1630.0	+15
C-3	80:20	60.9	+9	45.8	0	53.4	+5	27.7	0	1481.0	+5
평균		60.7		48.9		54.9		27.5		1497.7	

※ 제방붕괴부의 측정위치는 제방마루폭 중앙지점임

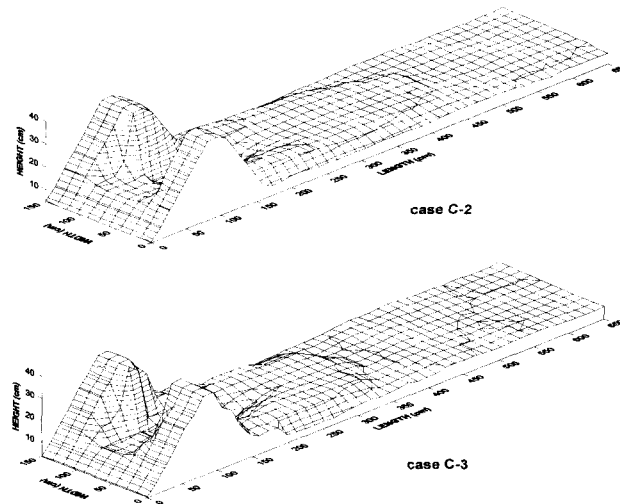


그림 3. 제방 축조재료의 혼합비와 붕괴부 형상

는 141.5cm이며, 뒷비탈 끝의 세굴폭은 36.9cm이었다. C-2 실험에서의 최심 세굴 위치는 170cm, 세굴심은 4.8cm, 세굴길이는 113.8cm, 세굴폭은 39.9cm이었으며, C-3 실험에서의 최심 세굴 위치는 185cm, 세굴심은 4.6cm, 세굴길이는 113.8cm, 세굴폭은 52.3cm이었다. 또한 제방 축조재료 혼합비 변화에 따른 붕괴부의 바닥세굴 형상에 대한 중단비, 횡단비 및 평면비는 표 4와 같다.

이상의 측정결과로부터 중단비는 모래구성비가 높아 점착력이 작은 제방단면(C-2)에서는 세굴깊이가 기준의 경우보다 깊었으며, 점착력이 큰 제방단면(C-3)의 경우에는 세굴 형상이 상대적으로 완만하게 이루어지고 세굴심은 얇고 세굴폭이 넓은 현상을 보였다(그림 3, 그림 4).

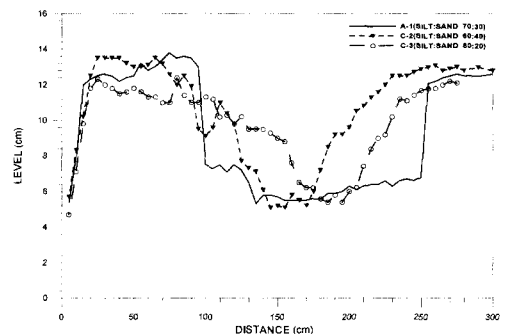


그림 4. 제방 축조재료의 혼합비와 제방붕괴로 인한 세굴중단도

표 4. 제방 축조재료의 혼합비와 붕괴부 바닥의 형상특성치

실험명	혼합비 (실트:모래)	시간 (분/초)	붕괴폭 (cm)	최심세굴 위치 (m)	세굴심 (d) (cm)	세굴길이 (l) (cm)	세굴폭 (w) (cm)	세굴 중단비 (l/d)	세굴 횡단비 (w/d)	세굴 평면비 (l/w)
A-1	70:30	5/30	50.9	1.35	-4.7	141.5	36.9	30.1	7.9	3.8
C-2	60:40	5/15	60.4	1.70	-4.8	113.8	39.9	23.7	8.3	2.9
C-3	80:20	6/45	53.4	1.85	-4.6	113.8	52.3	24.7	11.4	2.2

※ 최심세굴위치는 앞비탈 끝에서부터의 수평거리  
 ※ 세굴심, 세굴길이 측정위치는 제방길이의 중앙

표 5. 제방다짐횟수 변화 실험조건

실험명	제방의 평균입경(mm)	마루폭(cm)	제방고(cm)	경사	다짐(회)	공급유량(l/s)
A-1	0.21	20	40	1: 2	3	6.1
D-2	0.21	20	40	1: 2	1	6.1
D-3	0.21	20	40	1: 2	6	6.1

2.2 제방다짐도와 붕괴특성

제방의 안전을 위하여는 충분한 다짐으로 토립자간의 공극을 최소화하여 외수에 의한 제방침윤선이 제방 비탈면으로 나오지 않도록 설계함으로써 제방 붕괴를 막을 수 있다. 본 실험에서는 제방 다짐을 3회를 기준으로 하고 기존 제방과 동일한 성토재료로서 다짐 횟수를 변화하여 모형을 축조하였으며, 이에 따른 제방붕괴특성을 실험을 통하여 연구하였다.

2.2.1 월류량과 붕괴속도

제방의 다짐도에 따른 붕괴특성을 분석하기 위하여 제방기준단면(마루폭 20cm, 경사 1 : 2, 높이 40cm, 다짐 3회 : A-1)을 기준으로 성토다짐횟수를 1회 및 6회로 변화하여 3개의 제방단면에 대한 수리모형실험을 하였다(표 5).

제방 성토재의 다짐정도에 따른 붕괴특성의 변화는 검토하기 위하여 A-1(기준단면)실험조건보다 다짐횟수를 줄인 1회로 하였을 경우(실험 D-2)에 대하여 붕괴특성을 측정하였다. 즉, 제방월류시작 2분부터 붕괴부가 형성되기 시작한 2분 15초 후인 4분 15초에 최대 월류량 66.0 l/sec로 측정되었다. 이 유량은 유입유량 6.1 l/sec의 약 10.8배에 달하며, 기준단면 A-1 실험의 최대유량 50.0 l/sec 보다 32%가 큰 값이다.

이 때의 침투월류량 발생시간은 낮은 제방다짐도로 인하여 침윤선 발달이 기준단면보다 15초 빠른 3분 30초에 발생하였고, 붕괴부가 발달되는 붕괴지속시간은

기준단면보다 1분 10초 빠른 4분 20초 이었다.

한편 제방 성토재 다짐을 기준단면보다 강화시킨 다짐횟수 6회(D-3 단면)는 제방월류시작 2분부터 붕괴부가 형성되기 시작한 1분 45초 후인 3분 45초에 최대 월류량 15.0 l/sec가 측정되었다.

이 유량은 유입유량 6.1 l/sec의 약 2.5배이며, 기준단면 A-1 실험에서의 최대유량 50.0 l/sec보다 약 70%가 감소된 것으로 측정되었다. 그러나 침투월류량의 발생시간 및 붕괴지속시간은 기준단면과 거의 비슷하였다(그림 5, 표 6).

이상의 실험을 통하여 제방 성토재의 다짐횟수가 적을수록 제방토립자의 공극이 넓어 침윤선의 영향으로 침투월류량이 커지면서 발생시간이 빨라지고, 붕괴지속시간도 짧아짐을 알 수 있었다.

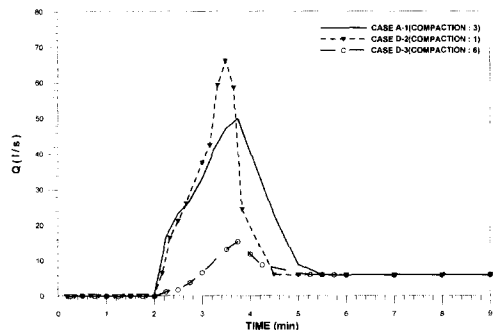


그림 5. 제방 다짐횟수 변화와 붕괴 홍수파의 수문곡선

표 6. 제방다짐횟수 변화실험의 붕괴시간 및 유량

실험명	다짐 횟수	붕괴시작시간 (분/초)	침투발생시간 (분/초)	붕괴지속시간		침투유량	
				(분/초)	중간비율(%)	(ℓ/sec)	중간비율(%)
A-1(기준)	3	2/00	3/45	5/30	0	50.0	0
D-2	1	2/00	3/30	4/20	-21	66.0	+32
D-3	6	2/00	3/45	5/30	0	15.0	-70

표 7. 제방 다짐횟수와 평균 붕괴폭

실험명	다짐 횟수	붕괴상부폭		붕괴하부폭		붕괴평균폭		붕괴깊이		붕괴면적	
		(cm)	비율(%)	(cm)	비율(%)	(cm)	비율(%)	(cm)	비율(%)	(cm <sup>2</sup> )	비율(%)
A-1(기준)	3	55.8	0	45.7	0	50.9	0	27.7	0	1409.0	0
D-2	1	91.3	+39	71.4	+36	81.4	+38	27.0	-3	2193.5	+44
D-3	6	49.7	-12	30.5	-50	40.1	-27	27.9	0	1118.0	-21
평균		65.6		49.2		57.5		27.5		1573.5	

※ 제방붕괴부의 측정위치는 제방마루폭 중앙지점임

### 2.2.2 붕괴폭

제방의 붕괴단면은 대체로 사다리꼴로서 기준단면인 A-1실험에서는 상부 55.8cm, 하부 45.7cm, 깊이 27.7cm이고 D-2실험에서는 상부 91.3cm, 하부 71.4cm, 깊이 27.0cm로 각각 측정되었으며, D-3실험에서는 상부 49.7cm, 또한 하부 30.5cm, 깊이 27.9cm로 붕괴되었다(표 7, 그림 6).

이 결과에서 알 수 있는 바와 같이 다짐이 느슨한 경우의 붕괴폭과 면적은 다짐이 잘 된 경우에 비하여 매우 크게 나타났다.

### 2.2.3 붕괴부의 형상과 확대과정

제방붕괴부의 바닥은 유입수의 소류작용으로 세굴구덩이와 두렁이 형성되며, 다짐횟수 1회(D-2)와 다짐횟

수 6회(D-3)의 경우에서 각 붕괴부 형상은 그림 6과 같다.

A-1 실험의 바닥 최심 세굴심은 제방 앞비탈 끝에서 135cm 지점에 4.7cm가 세굴되었고 바닥이 세굴된 길이는 141.5cm이며, 뒷비탈 끝의 세굴폭은 36.9cm이었다. D-2 실험의 최심 세굴 위치는 140cm, 세굴심은 6.2cm, 세굴길이는 104.6cm, 세굴폭은 49.2cm이었다. D-3 실험의 최심 세굴 위치는 140cm, 세굴심은 0.2cm, 세굴길이는 46.1cm, 세굴폭은 15.3cm이었다. 다짐횟수 변화에 따른 붕괴부의 형상에 대한 종단비, 횡단비 및 평면비는 표 8과 같다. 이상의 측정결과로부터 다짐횟수가 많을수록 붕괴부 바닥 세굴심은 얕아지며, 세굴 웅덩이의 규모도 줄어들음을 알 수 있다.

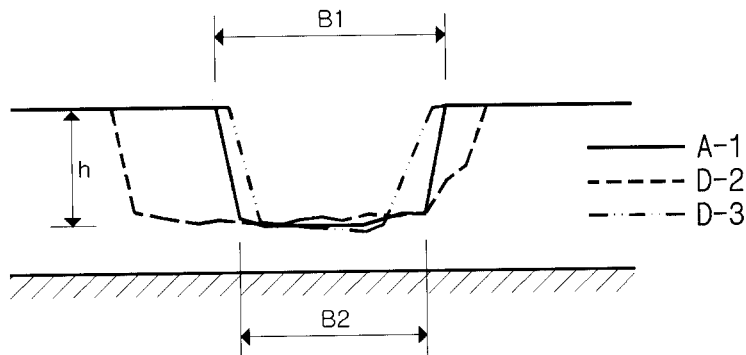


그림 6. 제방 다짐횟수와 제방붕괴양상

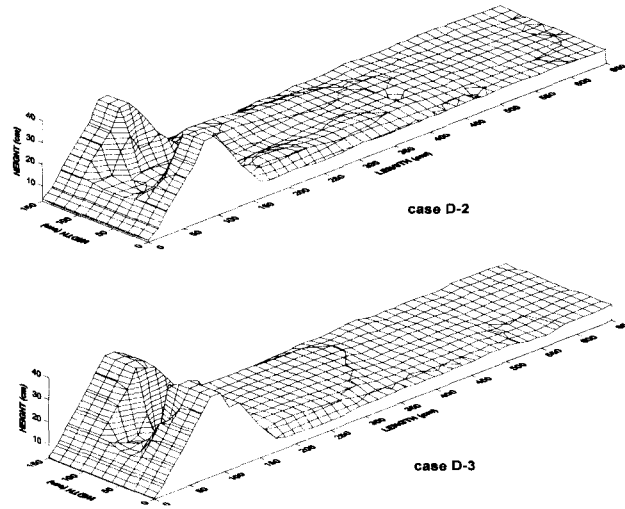


그림 7. 제방 다짐횟수와 붕괴부 형상

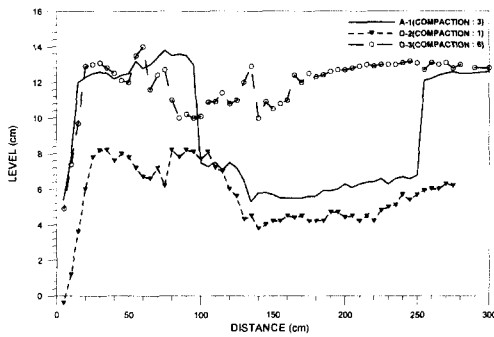


그림 8. 제방 다짐횟수와 제방붕괴로 인한 세굴종단도

### 3. 하천제방 단면특성과 붕괴 양상 분석

제방의 주요 특성치인 제방 마루폭, 제방비탈경사, 제방축조재료와 제방다짐에 대한 실험조건들을 종합하여 다시 정리하면 표 9와 같다. 표에서 실험 A-1의 단면을 기준단면으로 각 경우에 대한 실험을 각각 실시하였으며, 그 결과들을 정리하고 비교 분석하였다.

#### 3.1 붕괴 과정

제방붕괴는 월류수에 의하여 뒷비탈에서부터 세굴이 시작된다. 즉, 뒷비탈 둑마루 어깨로부터 비탈사면에 걸쳐 소규모의 붕락이 형성되면서 일정시간이 경과되어 침식깊이가 발달되면서 확폭이 시작된다. 또한 제방 붕괴 초기의 세굴토사는 비탈끝 바다에 퇴적되어 부채꼴 형태를 이루기 시작하고 점차 제방이 붕괴되면서 월류량이 증가되면 오히려 비탈 끝부분의 세굴이 시작된다. 세굴은 깊어지고 세굴과정에서 발생한 바다토사

표 8. 제방 다짐횟수와 붕괴부의 형상특성치

실험명	마루폭 (cm)	시간 (분/초)	붕괴폭 (cm)	최심 세굴위치 (m)	세굴심 (d) (cm)	세굴길이 (l) (cm)	세굴폭 (w) (cm)	세굴 종단비 (l/d)	세굴 횡단비 (w/d)	세굴 평면비 (l/w)
A-1	3	5/30	50.9	1.35	4.7	141.5	36.9	30.1	7.9	3.8
D-2	1	4/20	81.4	1.40	6.2	104.6	49.2	16.9	7.9	2.1
D-3	6	5/30	40.1	1.40	0.2	46.1	15.3	230.5	76.5	3.0

※ 최심세굴위치는 앞비탈 끝에서부터의 수평거리

※ 세굴심, 세굴길이 측정위치는 제방길이의 중앙

표 9. 제방의 주요 특성치 실험 현황

실험명	마루폭 (cm)	제방고 (cm)	비탈경사	제방축조재료(%)		다짐(회)	비 고
				실트	모래		
A-1	20	40	1 : 2	70	30	3	기준
A-2	10	40	1 : 2	70	30	3	마루폭비교
A-3	30	1 : 2	70	30	3	마루폭비교	
B-2	20	40	1 : 1.5	70	30	3	제방경사비교
B-3	20	40	1 : 2.5	70	30	3	제방경사비교
C-2	20	40	1 : 2	60	40	3	제방축조재료비교
C-3	20	40	1 : 2	80	20	3	제방축조재료비교
D-2	20	40	1 : 2	70	30	1	제방다짐비교
D-3	20	40	1 : 2	70	30	6	제방다짐비교

※ 기준단면 : 마루폭(20cm), 비탈경사(1:2), 제방축조재료비(70:30), 다짐횟수(3회)

와 제방 붕괴부의 토사는 유수에 의하여 제방내측으로 멀리 유송되고 일부는 세굴공의 양측면에 연하여 작은 둔덕을 이룬다. 세굴깊이는 바다 근처에 이르면 그 발달이 정지된다. 제방의 붕괴는 초기에 삼각형을 이루다가 침투유출량에 이르는 시점을 전후하여 붕괴가 급진전되었다가 수조의 수위하강에 따른 월류량이 감소되면서 붕괴부의 발달이 정지되며, 결국 붕괴부의 최종의 형태는 상부폭이 넓은 사다리꼴로 형성된다.

### 3.2 붕괴부의 형상

실험결과로 나타난 제방의 붕괴단면은 부분적으로 불규칙한 형상을 보였으며, 국부적으로는 역경사의 붕괴부를 형성하기도 하였으나 일반적으로는 사다리꼴이었다(그림 9). 기준단면 A-1과 비교할 수 있도록 각 경우에서의 제방 붕괴부의 주요 특성치를 표 10과 같이 종합 정리하였다.

실험에서 붕괴과정의 2~3단계에서는 붕괴부 폭이 불연속으로 증가하며, 붕괴폭의 확대는 붕괴부의 바다

부분에서부터 확폭을 보이면서 역경사 측면을 형성하다가 결국 붕락되면서 새로운 사면을 형성하는 과정을 반복하며 확폭되어 나간다. 따라서 붕괴부의 상부폭은 하부폭의 발달에 의하여 종속되는 결과로 이해될 수 있겠다.

전체 실험결과를 평균한 결과 상부 평균붕괴폭 약 69.3cm, 하부 평균붕괴폭 약 51.4cm, 붕괴평균깊이 약 28.1cm로서 측면면 경사 Z는 0.32로서 Fread와 MacDonald가 제안한  $0 \leq Z \leq 2$  범위 이내에 해당되었다.

특히, 붕괴부 하부폭은 제방마루폭과 비탈경사도, 축조재료의 점착력 및 다짐의 정도에 따라 상당한 편차를 보였다. 즉, 제방 마루폭이 좁고(A-2), 제방경사가 급한 경우(B-2), 제방 축조재료의 모래성분이 많아 점착력이 약하거나(C-2) 다짐도가 약한 경우(D-2)에는 세굴이 상대적으로 신속히 이루어져 붕괴폭이 뚜렷이 크게 측정되었다.

실험결과로부터 붕괴평균폭은 약 60.4cm로서 실험

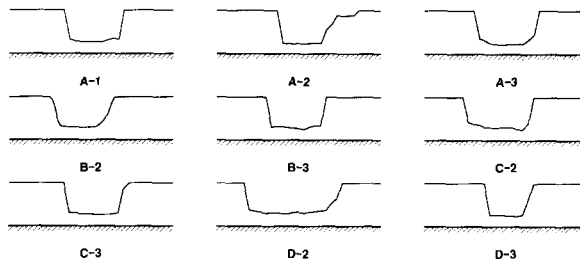


그림 9. 제방의 주요 특성치 변화에 의한 제방붕괴 형태



표 10. 제방 붕괴부의 주요 특성치 비교

실험명	구분	붕괴 상부폭	붕괴 하부폭	붕괴 평균폭(B)	제방높이 (H)	붕괴깊이	붕괴면적 (cm <sup>2</sup> )	B/H	측면경사 (Z)	비고
A-1		55.8	45.9	50.9	40.0	27.7	1,409	1.27	0.18	기준
A-2	10cm	75.1	48.3	61.7	40.0	28.2	1,738	1.54	0.48	
A-3	30cm	50.7	36.5	43.6	40.0	30.3	1,322	1.09	0.23	
B-2	1:1.5	55.7	36.8	46.3	40.0	29.0	1,338	1.16	0.33	
B-3	1:2.5	55.6	46.2	50.9	40.0	27.7	1,408	1.27	0.17	
C-2	60:40	65.4	55.3	60.4	40.0	27.0	1,630	1.51	0.19	
C-3	80:20	60.9	45.8	53.4	40.0	27.7	1,481	1.34	0.27	
D-2	1회	91.3	71.4	81.4	40.0	27.0	2,193	2.04	0.37	
D-3	6회	49.7	30.5	40.1	40.0	27.9	1,118	1.00	0.34	
평균		69.3	51.4	60.4	40.0	28.1	1,515	1.51	0.32	

의 결과(B/H=1.51)는 Fread(1977)가 제시한 붕괴부 형태 범위(H≤B≤3H)에 해당되는 결과를 보였다.

제방 붕괴의 면적은 그림 10에서 볼 수 있는 바와 같이 다짐도, 제방 마루폭의 순으로 영향을 받음을 알 수 있었다. 한편 제방 경사도가 붕괴단면적에 주는 영향은 본 연구실험에서는 판단할 수 없었으며, 이에 관한 추가적인 연구가 요망된다.

3.3 제방단면 특성과 월류량

제방붕괴 양상을 측정하기 위하여 유량공급량을 6.1 l/sec로 일정하게 유지하면서 9개 실험에서의 제방붕괴 시작시간, 붕괴지속시간, 침투유량 발생시간 등을 측정하고 침투유량의 크기를 유입량과 비교하였다(표 11).

붕괴시작시간은 약 2분 내외로 실험조건에 관계없이 비교적 균일한 값을 보여주었다. 그러나 제방의 마루폭과 축조재료는 초기 붕괴부의 형성에 상당한 영향을 줄 수 있음을 알 수 있었다.

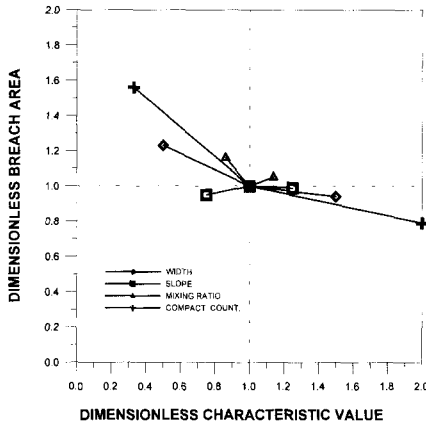
이상의 실험결과로부터 붕괴지속시간은 축조재료, 다짐도, 비탈경사의 순으로 영향을 받고 있음을 알 수 있었다. 즉, 제방 축조재료의 점착력이 큰 경우와 다짐이 잘 된 경우에는 붕괴지속시간이 길어지며, 반면에 제방폭이 좁고, 제방 축조재료의 점착력이 작고 다짐이 느슨한 경우에서의 붕괴과정 제 2, 3단계는 신속히 이루어지고 월류량도 큰 결과를 보였다.

제방단면의 주요 특성치 변화에 대한 붕괴부 면적과 침투월류량의 무차원비를 그림 10, 그림 11과 같이 표현하였다. 이 그림에서 알 수 있는 바와 같이 붕괴부 단면적에 대하여서는 제방다짐도가 가장 큰 영향을 주었으며, 침투월류량에 대해서는 제방축조재료의 혼합비와 다짐도가 큰 영향을 줄 수 있었고 비탈경사가 다음으로 영향을 주고 있음을 알 수 있었다. 그러나 제방의 마루폭은 상대적으로 그 영향이 작음을 보여주고 있다.

한편 제방붕괴 지속시간은 4분 20초~6분 45초로 Froude 상사법칙에 의한 환산율을 적용하면 원형의

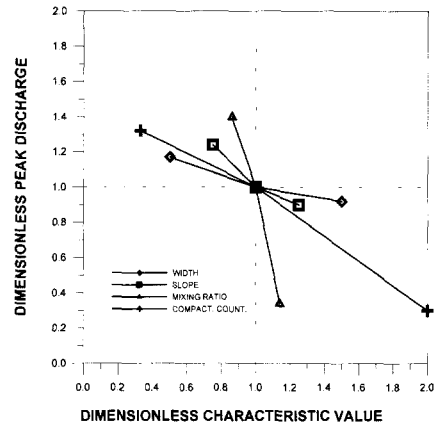
표 11. 제방 주요 특성치 변화 실험의 붕괴시간과 유량

실험명	구분	붕괴시작시간 (분/초)	붕괴지속시간 (분/초)	침투발생시간 (분/초)	침투유량 (l/sec)	비 고
A-1		2/00	5/30	3/45	50.0	기준
A-2	10cm	2/00	5/15	3/15	58.5	
A-3	30cm	2/30	5/45	4/15	46.0	
B-2	1:1.5	2/00	5/30	4/15	62.0	
B-3	1:2.5	2/00	6/00	3/45	45.0	
C-2	60:40	2/00	5/15	3/30	70.0	
C-3	80:20	2/30	6/45	4/45	17.0	
D-2	1회	2/00	4/20	3/30	66.0	
D-3	6회	2/00	5/30	3/45	15.0	



※ A-1 실험단면을 기준단면으로 함.

그림 10. 제방단면 특성치와 붕괴부 면적의 무차원 관계곡선



※ A-1 실험단면을 기준단면으로 함.

그림 11. 제방단면 특성치와 첨두유량의 무차원 관계곡선

붕괴지속시간은 19분 20초~30분이었으며, 이는 Singh (1982), MacDonald(1989), Fread(1977) 등이 조사한 붕괴지속시간  $0.1 \leq T \leq 0.5$ 시간 범위에 해당하였다.

### 3.4 제방단면의 특성치와 바닥 세굴형태

본 연구에서는 제방의 붕괴에 따른 붕괴부의 평면형상을 제방을 중심으로 제외, 내측의 일정 바닥구간에 대하여 검토하였다. 붕괴부의 평면형상을 세굴심, 최심 세굴위치, 세굴길이, 세굴폭 및 종단비, 횡단비, 평면비 등을 종합적으로 분석 정리한 결과는 표 12와 같다.

이 결과로부터 알 수 있는 바와 같이 제방 마루폭이 좁아 제방폭이 좁은 경우에는 제방의 침식에 대한 저항단면이 작음으로 인하여 붕괴부의 확폭이 현저하고

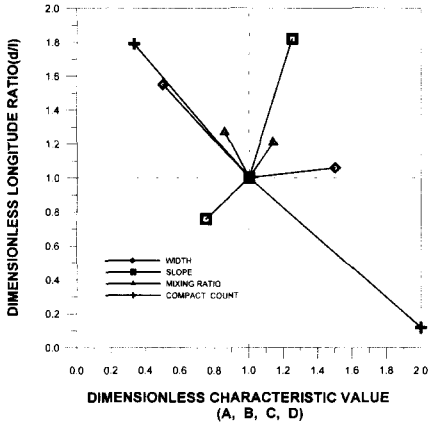
이에 따라 세굴의 폭도 상대적으로 넓으며, 하류방향으로 깊고 폭넓은 세굴 형태가 형성된다. 한편 제방폭이 넓은 경우에는 유수의 제방통과구간이 길면서 붕괴부의 확폭 속도가 낮기 때문에 세굴 형태는 상대적으로 세장하게 됨을 알 수 있었다.

또한 제방폭이 좁은 경우에는 세굴의 양측에 따라 제방 침식토사의 유송경로가 짧아지므로 세굴구덩이의 되메움은 적고, 제방폭이 넓은 경우에는 제방 침식토사에 의한 되메움이 발생하는 현상을 보였다.

한편 제방 경사도가 완만한 경우에 비탈면에서의 월류흐름을 수로형태로 발달시켜 오히려 강한 유속을 유발하였으며, 이로 인하여 바닥세굴이 심하고 세굴종단비는 상대적으로 작게 나타남으로써 급경사의 웅덩이

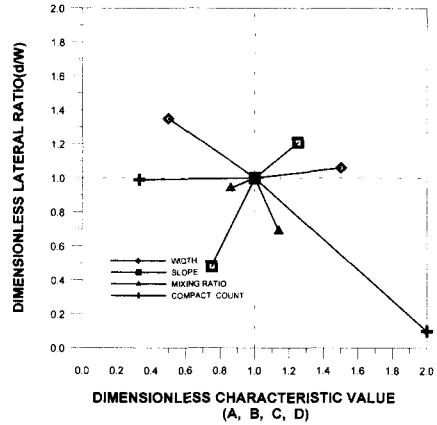
표 12. 제방의 주요 특성치 변화에 의한 붕괴부의 형상 특성치

실험명	마루폭 (cm)	시간 (분/초)	평균 붕괴폭 (cm)	최심 세굴위치 (m)	세굴심 (d) (cm)	세굴길이 (l) (cm)	세굴폭 (w) (cm)	종단비 (l/d)	횡단비 (w/d)	평면비 (l/w)
A-1		5/30	50.9	1.35	4.7	141.5	36.9	30.1	7.9	3.8
A-2	10cm	5/15	61.7	1.40	6.9	135.0	39.9	19.6	5.8	3.4
A-3	30cm	5/45	43.6	1.70	5.0	141.0	36.9	28.2	7.4	3.8
B-2	1:1.5	5/30	46.3	1.45	3.4	132.3	55.3	38.9	16.3	2.4
B-3	1:2.5	6/00	50.9	1.90	7.1	116.9	46.1	23.5	6.5	2.5
C-2	60:40	5/15	60.4	1.70	4.8	113.8	39.9	23.7	8.3	2.9
C-3	80:20	6/45	53.4	1.85	4.6	113.8	52.3	24.7	11.4	2.2
D-2	1회	4/20	81.4	1.40	6.2	104.6	49.2	16.9	7.9	2.1
D-3	6회	5/30	40.1	1.40	0.2	46.1	15.3	230.5	76.5	3.0
평균		5/43	55.0	1.57	4.8	116.1	41.3	24.2	8.6	2.9



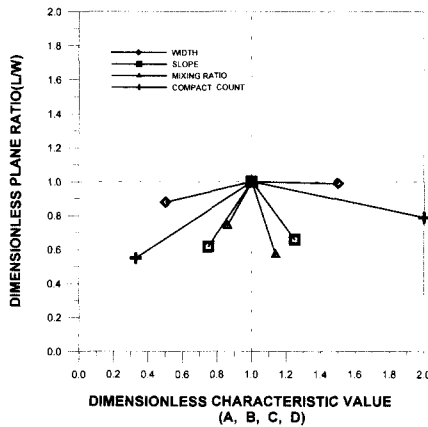
※ A-1 실험단면을 기준단면으로 함.

그림 12. 제방단면 특성치와 세굴 종단비의 무차원 관계곡선



※ A-1 실험단면을 기준단면으로 함.

그림 13. 제방단면 특성치와 세굴 횡단비의 무차원 관계곡선



※ A-1 실험단면을 기준단면으로 함.

그림 14. 제방단면 특성치와 세굴 평면비의 무차원 관계곡선

를 형성하였다.

제방축조재료비와 다짐으로 인하여 제방의 소류력에 대한 저항력이 증가되면 바다세굴 깊이가 얕아져 종단비와 횡단비가 커지는 경향을 보였다.

제방 특성치들과 종단비와의 무차원 관계는 그림 12와 같으며, 다짐도와 경사도의 영향이 컸으며 제방 마루폭과 제방 축조재료의 영향은 상대적으로 작았다. 특성치들과 횡단비의 무차원관계는 그림 13와 같으며, 다짐도와 경사도의 영향이 컸고 제방 마루폭과 배방축조재료 혼합비의 영향은 상대적으로 작았다. 또한 특성치들과 평면비의 무차원관계는 그림 14와 같으나 제방

단면 특성치에 따른 평면비의 변화에 일괄성있는 성향을 찾을 수 없었으며, 이에 관하여서는 추가적인 실험과 연구 검토가 요망된다.

이상의 제방 마루폭, 경사도, 제방 축조재료 및 다짐 횡수 등의 하천제방단면의 특성치의 변화에 따른 각종 붕괴실험 결과를 붕괴지속시간, 침투유량, 붕괴평균폭, 붕괴깊이, 붕괴면적, 세굴심, 종단비, 횡단비 및 평면비에 대하여 기준제방단면을 기준으로 그 증감율을 비교하면 표 13, 표 14와 같다.

이들 표에서 알 수 있는 바와 같이 제방단면의 붕괴 특성에 주는 영향을 전반적으로 제방 축조재료의 다짐

표 13. 주요 붕괴특성치들의 변화율 비교(실험별)

(단위 : %)

실험명	구분	붕괴지속시간	침투 유량	붕괴 평균폭	붕괴 깊이	붕괴 면적	세굴심	종단비 (l/d)	횡단비 (w/d)	평면비 (l/w)
A-1	기준	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A-2	10cm	-5	+17	+18	+2	+23	+47	-55	-35	-12
A-3	30cm	+5	-8	-17	+9	-7	+6	+6	+6	0
B-2	1:1.5	0	+24	-10	+5	-5	-28	+24	+52	-38
B-3	1:2.5	+13	-10	0	0	0	+51	-82	-21	-34
C-2	60:40	-5	+40	+18	-3	+15	+2	-27	+6	-26
C-3	80:20	+23	-66	+5	0	+5	-2	-21	+31	-43
D-2	1회	-15	+32	+38	-3	+44	+32	-79	+1	-45
D-3	6회	0	-70	-27	0	-21	-96	+88	+90	-21

표 14. 주요 붕괴특성치들의 변화율 비교(특성치)

구분	증가		감소		비고
	최대(%)	제방특성치	최소(%)	제방특성치	
붕괴지속시간	23	축조재료	15	다짐도	
침투유량	40	축조재료	70	다짐도	
붕괴 평균폭	38	다짐도	27	다짐도	
붕괴깊이	9	마루폭	3	축조재료, 다짐도	
붕괴면적	44	다짐도	21	다짐도	
세굴심	51	경사도	96	다짐도	
종단비	88	다짐도	82	경사도	
횡단비	90	다짐도	35	마루폭	
평면비	0	마루폭	45	다짐도	

에 의한 영향이 가장 컸으며, 제방 축조재료의 영향이 다음으로 그 영향이 컸다. 한편 축조재료는 침식과 침투에 강한 실트와 점토질로 잘 다져서 성토한 제방은 붕괴지속시간 지연에 효과적임을 알 수 있었다.

또한 제방 마루폭의 영향은 제방붕괴깊이에 영향을 주었으며, 제방경사도는 바닥세굴심에 비교적 큰 영향을 주는 것으로 분석되었다.

이상의 실험 결과로부터 제방단면의 주요 특성치 중 제방붕괴에 미치는 영향의 순위는 다짐도, 제방 축조재료, 제방 마루폭, 경사도 등의 순인 것으로 판단되었다 (표 13, 표 14).

#### 4. 결 론

하천제방의 마루폭, 비탈경사, 축조재료 및 다짐도 등의 제방단면의 주요 특성치들이 홍수류의 범람으로 인한 제방붕괴양상에 미치는 각종 영향들을 실험을 통하여 분석하였다. 즉, 단면의 특성을 달리하는 9개 붕

괴실험을 통하여 붕괴시작시간, 붕괴지속시간, 침투유량, 붕괴부 평균폭, 붕괴깊이, 붕괴부 측면경사, 바닥세굴심 및 세굴깊이와 세굴폭 등을 측정하고 제방단면 특성치들의 영향을 분석하였으며, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 제방단면 특성치들이 월류로 인한 제방붕괴 양상에 미치는 영향은 다짐도, 축조재료, 마루폭, 비탈경사의 순으로 컸다.

(2) 붕괴지속시간을 지연시키고 침투유량을 저감시키기 위해서는 마루폭을 넓히고 비탈경사를 완화하는 것도 중요하지만 내침식성과 차수성이 양호한 축조재료의 선택과 아울러 충분한 다짐으로 축조하는 것이 가장 효과적인 것으로 판단된다.

(3) 제방붕괴로 인한 붕괴부의 바닥세굴 형태에 대하여 실험 측정하였으며, 마루폭이 좁고 다짐이 느슨하거나, 비탈경사가 완만한 경우에 상대적으로 깊은 세굴심을 보였다. 또한 바닥세굴부의 형상에는 다짐도와 경

사도의 영향이 컸다.

(4) 본 실험에서 측정된 붕괴지속시간, 붕괴폭의 제방고에 대한 비, 붕괴부 측면 경사 등은 Singh, Fread 및 MacDonald 등이 흙댐에 관하여 제시한 범위내에 모두 해당됨으로써 이들 범위는 제방에도 적용이 가능함을 확인하였다.

### 감사의 글

본 실험연구를 위하여 실험실 관리와 재료 선별, 공급 등에 도움을 주신 당시 건교부 토목시험소 운병모 선생과 경기대학교 수공학연구실의 강태호(현 (주)DA TAPCS)박사, 전형준(현 삼안기술공사), 허성철(현 남원건설 ENG), 최광운 및 박상식 군들의 적극적인 도움에 감사드립니다.

### 참고 문헌

이상태(1998), “하천 제방의 단면 특성과 붕괴양상에

관한 실험 연구”, 경기대학교 박사학위논문

Fread D.L.(1977), “The Development and Testing of a Dam-Break Flood Forecasting Model”, *Proc. of the Dam-Break Flood Routing Workshop Water Resources Council.*

MacDonald, T.C., and Jennifer, L.M.(1984), “Breaching Characteristics of Dam Failures”, *J. of HY Div, Vol. 110, No. 5, ASCE*, pp. 567~586.

Singh, K.P.(1982), “Dam Safety Program”, *Univ. of Illinois, Champaign, Illinois.*

(논문번호:01-008/접수:2001.01.26/심사완료:2001.03.23)